

0- 786868

На правах рукописи



ЗАРИПОВА ЭЛЬВИРА ХАМИТОВНА

**ПОЛУЧЕНИЕ ПИЩЕВЫХ ПОРОШКОВ ИЗ
РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ В ВИБРАЦИОННОЙ СУШИЛКЕ-МЕЛЬНИЦЕ**

05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2011

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Казанский государственный технологический университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук,
профессор Николаев
Андрей Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор Зиганшин
Булат Гусманович,
кандидат технических наук,
доцент Никаноров Сергей
Николаевич

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000583976

Ведущая организация:

ГОУ ВПО «Марийский
государственный
университет» г.Йошкар-Ола

Защита диссертации состоится 25 марта 2011 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.080.06 при ГОУ ВПО «Казанский государственный технологический университет» по адресу: 420015, г. Казань, ул. К.Маркса, 68 (зал заседаний учёного совета), А –330.

Автореферат выставлен на сайте www.kstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Казанского государственного технологического университета»

Автореферат разослан «21» февраля 2011 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор

Поникаров С.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Основной целью пищевой промышленности является гарантированное снабжение населения качественными натуральными продуктами и обеспечение длительного срока хранения сырья для пищевой индустрии.

Традиционные формы хранения и транспортирования растительного сырья (в натуральном и замороженном виде, в виде консервированных соков, паст и т.д.) имеют ограниченные сроки хранения даже при организации условий хранения в узком диапазоне оптимальных параметров окружающей среды в хранилищах, а большой объём, делает их хранение и транспортировку сложным, дорогостоящим, громоздким и энергоёмким. При этом неизбежны потери, как самого продукта, так и его ценных компонентов при хранении и воздействии внутренней влаги и температуры.

Порошковый способ является наиболее перспективным, эффективным и компактным способом длительного, без потерь, хранения и транспортировки растительного сырья. Кроме того, в качестве сырья для этой технологии, наряду с натуральным цельным сырьём, могут использоваться остатки других производств по переработке ягод, фруктов, овощей.

Пищевые порошки имеют целый ряд особенностей, которые выгодно отличают их от других форм пищевых продуктов. Они освобождены от значительной части влаги, содержащейся в обычных продуктах, в связи с чем, имеют незначительный объём, массу и высокую концентрацию питательных веществ. Низкая влажность порошков благоприятствует их длительному хранению без потери качества. Порошки обладают высокими органолептическими свойствами и максимально сохраняют питательные свойства исходного продукта.

Существующие способы получения порошков состоят из двух этапов: сушки и измельчения, являются громоздкими в аппаратном оформлении, энергоёмкими, продолжительными по времени. Поэтому разработка способа получения порошков совмещением процессов сушки и измельчения при интенсивном перемешивании в одном аппарате весьма актуальна. Часть результатов работы получено в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Цели и задачи работы. Целью работы является экспериментальное и теоретическое исследование процесса получения порошков из растительного сырья в вибрационной сушилке-мельнице непрерывного действия, разработка его математического описания и создание методики инженерного расчета.

В непосредственные задачи исследования входило:

- проведение экспериментальных исследований эффективности предложенного способа и влияния различных факторов на кинетику процессов сушки и измельчения.
- выбор оптимальных параметров процессов сушки, смешения и измельчения при получении порошков в вибрационной сушилке-мельнице.

- разработка математического описания процесса сушки при комбинированном подводе тепла с учетом особенностей теплообмена в виброкипящем слое материала и кинетики измельчения в процессе получения порошков.
- разработка инженерной методики расчета вибрационной сушилки-мельницы и рекомендаций по внедрению.

Научная новизна.

1. Разработана экспериментальная установка и получены экспериментальные данные по кинетике процессов измельчения и сушки растительного сырья в вибрационной сушилке-мельнице непрерывного действия.
2. Разработаны математическое описание и методика расчета процесса получения порошков из растительного сырья с учетом особенностей теплообмена и кинетики измельчения в вибрационной сушилке-мельнице.
3. Определены рабочие параметры вибрационной сушилки-мельницы, обеспечивающие максимальную степень циркуляции загрузки и эффективность сушки.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием фундаментальных законов тепло- и массообмена, а также хорошей сходимостью результатов расчетных и экспериментальных данных.

Практическая ценность. Разработаны способ получения порошков из растительного сырья, совмещающий процессы сушки и вибрационного измельчения материала в одном аппарате и вибрационная сушилка-мельница непрерывного действия, обеспечивающая получение порошков высокой дисперсности и низкой влажности (4-8 % химически связанной влаги). На конструкцию получен положительное решение по патенту на изобретение. На полученные порошки выдан гигиенический сертификат и разработаны технические условия. Разработана методика технологического расчета вибрационной сушилки-мельницы. Разработана техническая документация на вибрационную сушилку-мельницу объемом 200 л. Промышленный образец аппарата принят к внедрению на ОАО «Таткрахмалпатока».

На защиту выносятся:

- математическое описание процесса сушки при комбинированном подводе тепла с учетом особенностей теплообмена в виброкипящем слое материала и кинетики измельчения в процессе получения порошков;
- результаты экспериментальных исследований по исследованию влияния различных параметров на кинетику сушки растительного сырья, вибрационного смещения и измельчения;
- методику и результаты расчета кинетики сушки и измельчения при интенсивном вибрационном воздействии.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались: на IV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Научный потенциал студенчества в XXI веке". г. Ставрополь, 2010; на III научно-практической конференции с международным участием "Современное состояние и перспективы развития пищевой промышленности и общественного питания", Челябинск, 2010; на II Международной научно-технической конференции "Новое в технике и технологии пищевых производств", Воронеж, 2010; на XXIII- Международная научная конференция "Математические методы в

технике и технологиях- ММТТ-23", Саратов, 2010; на 3-ей Всероссийской научно-практической конференции "Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности", Бийск, 2010; на V научно-практической конференции молодых ученых, Магнитогорск, 2010; на Международный научно-технический семинар "Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов", Воронеж, 2010.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных результатов, приложений и списка литературы, содержащего 164 источников. Работа изложена на 181 страницах печатного текста (из них 21 - приложения) и содержит 40 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана необходимость решения проблемы хранения и переработки растительного сырья, а также актуальность проблемы создания новых энергосберегающих технологий переработки растительного сырья с сохранением его исходных ценных компонентов.

В первой главе на основании анализа химического состава, строения, питательной ценности, полезных свойств различных классов растительного сырья и широты применения как компонентов пищи произведен выбор необходимых и ценных представителей этих классов как объектов исследования.

Выполнен обзор различных способов хранения растительного сырья, показаны их преимущества и недостатки. Представлена порошковая форма, являющаяся наиболее перспективным, эффективным и компактным способом длительного, без потерь, хранения и транспортировки растительного сырья.

Существующие технологии переработки растительного сырья в порошки являются энергоемкими, громоздкими в аппаратном оформлении, продолжительны по времени. Представлена новая технология получения порошков из растительного сырья. Процесс сушки проводится при пониженном давлении с применением внешнего подогрева при сопутствующем измельчении и смешении. Измельчение продукта в процессе сушки мелющими телами, загружаемыми в аппарат, постоянно обновляет поверхность испарения со свободной влагой, обеспечивая первый период сушки на все время процесса, а также исключает налипание частиц загрузки на греющую поверхность. Вибрационное перемешивание всей загрузки способствует выравниванию температуры и влажности во всем объеме загрузки и интенсификации теплообмена. Вакуумирование позволяет исключить перегрев материала, обеспечивая сохранение всех качеств исходного продукта. При этом для поддержания температуры высушиваемого материала производится подвод тепла через нагретую поверхность и конвективно, компенсирующий теплоту парообразования и различные потери тепла.

Одним из направлений интенсификации технологических процессов является переход от периодического к непрерывному производству. При этом предложено интенсифицировать теплообмен комбинацией контактного и конвективного

подвода тепла к объекту сушки при интенсивном перемешивании последнего, а также избыточной загрузкой аппарата из расходного бункера за счет естественного подпора столба подготовленного сырья и поддержания начального коэффициента заполнения аппарата, равного единице. Разработана конструкция вибрационной сушилки-мельницы непрерывного действия, которая состоит из корпуса, представляющего собой горизонтальный барабан (рис.1), имеющий теплообменную рубашку для прохода сушильного агента.

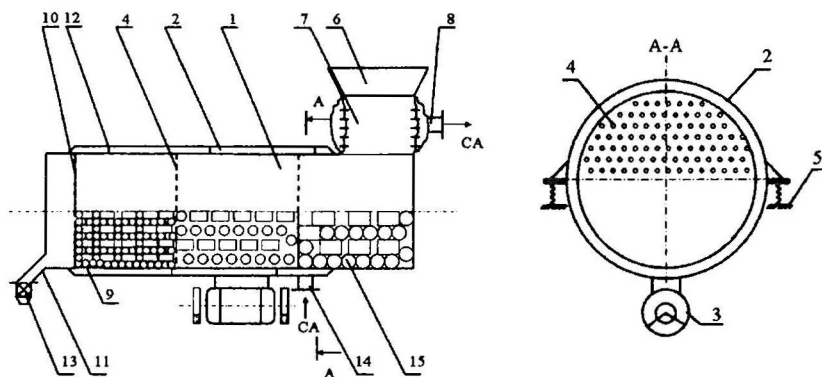


Рис.1. Вибрационная сушилка-мельница непрерывного действия

Вымытое и предварительно подготовленное сырье загружается в расходный бункер и через загрузочный рукав заполняет полностью первую секцию барабана. При этом в бункере и загрузочном рукаве находится исходное сырье для поддержания в первой секции коэффициента заполнения 1. Инерционный вибратор приводит корпус в колебательное движение. Избыток жидкой фазы исходного сырья более 0,5 объема I секции переходит через перфорированную перегородку между I и II секциями в последующие секции, образуя в них пористую среду в виде частиц измельченного сырья и шаровой загрузки с развитой поверхностью испарения влаги. При этом частицы сырья продолжают измельчаться и сушиться, получая тепло, контактируя с нагретой стенкой корпуса и нагретыми шарами, а также через конвективный теплообмен с сушильным агентом, проходящим через весь корпус от последней секции к первой. Сплошная жидкая фаза (паста) сохраняется только в первой секции, а в остальных секциях имеет место дисперсная среда, находящаяся во взвешенном состоянии.

Сушильный агент подается в теплообменную рубашку и, равномерно по всей поверхности нагревает корпус барабана, а, дойдя до перфорированной зоны последней секции барабана, попадает внутрь последнего – в зону конвективного теплообмена. Увеличение площади сечения движения сушильного агента при переходе из рубашки в корпус значительно снижает его скорость, способствуя более полному теплообмену между ним и частицами, находящимися во взвешенном состоянии, что интенсифицирует процесс сушки. Сушильный агент, пройдя через перфорированные перегородки секций, попадает в первую секцию, полностью заполнен-

ную исходным влажным продуктом, где предварительно нагревает его и полностью очищается от уносимой мелкой фракции готового порошка, которая налипает на влажную поверхность частиц исходного продукта при прохождении через поры между частицами. Очищенный, охлажденный и насыщенный парами влаги сушильный агент удаляется. Готовый сухой порошок удаляется через перфорированную торцевую стенку последней секции, выгрузочный люк и затвор.

Комплексные лабораторные и промышленные испытания проведены на установках объемом 1 и 200 литров, получены порошки из различных видов растительного сырья (корнеплоды, ягоды, травы).

Изложение первой главы завершается постановкой основных задач исследования.

Во второй главе представлен анализ литературы по движению и взаимодействию загрузки с корпусом аппарата с целью определения оптимальных параметров вибрации из условия максимально интенсивного перемешивания материала. Интенсивная циркуляция загрузки начинается с 30 % влажности перерабатываемого продукта. Поскольку в аппарате перерабатывается высоковлажное растительное сырье было определено условие отрыва жидкой фазы от вибрирующей поверхности.

Обработка С-кривых позволила определить среднее время пребывания материала в аппарате и производительность аппарата при различных рабочих параметрах установки. По производительности и габаритам смесителя с учетом коэффициента заполнения корпуса рассчитана средняя линейная скорость транспортировки материала. Оценка точности результатов исследования произведена сравнением реальной и расчетной длин аппарата. Среднеквадратичное отклонение составляет $S = \pm 0,186$ или $\Delta L = \pm 0,0064$ м ($\pm 8\%$).

Методом Брандона найдены уравнения зависимости среднего времени пребывания, производительности и средней скорости движения материала в корпусе от рабочих параметров.

$$\bar{\tau} = 1,009(-339,49 + 689,44k_{\text{зп}} + 432,33k_{\text{зп}}^2)(3,74 - 4,02A_k + 1,388A_k^2) \times (3,2708 - 0,0123\omega + 1,58 \cdot 10^{-5}\omega^2) \quad (1)$$

$$Q = 1,609(2111,37 - 1905,79k_{\text{зп}} - 157,81k_{\text{зп}}^2)(-1,497 + 4,567A_k - 1,875A_k^2) \times (-2,617 + 0,0195\omega - 2,063 \cdot 10^{-5}\omega^2) \quad (2)$$

$$\bar{W}_L = 1,015(30,962 - 54,93k_{\text{зп}} + 24,367k_{\text{зп}}^2)(-1,107 + 3,8459A_k - 1,358A_k^2) \times (1,0662 - 0,00259\omega + 6,3327 \cdot 10^{-6}\omega^2) \quad (3)$$

Данные зависимости были проверены на адекватность сравнением расчетных и табличных значений критериев Фишера. Соотношение этих критериев соответственно для уравнений (1), (2), (3) следующие: $F_{\text{расч}} : 0,13; 0,44; 0,14$ $F_{\text{табл}} : 1,9$ при $p = 0,05$, $f_1 = 35$; $f_2 = 18$. В результате было установлено, что полученные уравнения адекватны эксперименту.

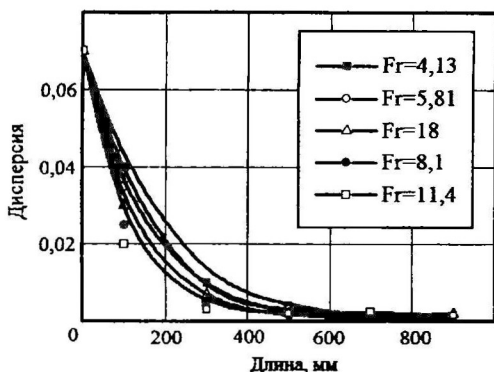


Рис.2. Кинетические кривые вибрационного смещения

смесителя, лежащих в пределах : $k_{\text{зеп}} = 0,5 - 0,7$; $A_k = 0,6 - 0,83$ мм; $\omega = 367$ рад/с, что соответствует значениям критериев параметрического $II_1 = 8,4 - 11,86$ и Фруда $Fr = 8,1 - 11,4$.

Значения критерия Фруда для непрерывного вибрационного смесителя соответствует интервалу, найденному для периодических вибрационных смесителей. Параметрический критерий увеличивается по сравнению с рекомендуемыми для периодических смесителей примерно в 1,7 раз, что объясняется разницей в траектории движения загрузки внутри корпуса, когда появляется составляющая скорости движения загрузки вдоль корпуса от входа к выходу, что приводит траекторию циркуляции загрузки к спиральной форме, увеличивая путь движения загрузки.

В третьей главе представлены экспериментальные исследования измельчения картофеля разной влажности при различных параметрах вибрации ($Fr = 11$, $Fr = 13$, $Fr = 17$). На основании полученных экспериментальных данных были рассчитаны

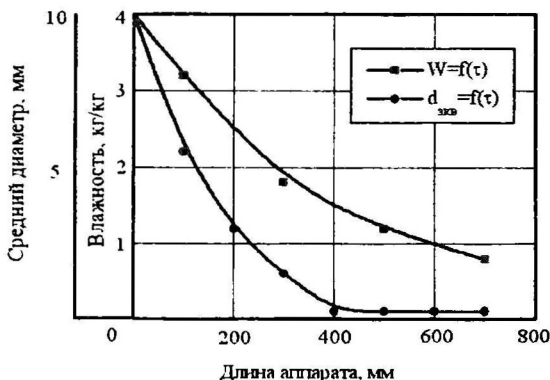


Рис.3. Кинетические кривые сушки и измельчения

По полученным уравнениям можно выбрать параметры вибрации для данных габаритов корпуса, позволяющие обеспечить время пребывания, требуемое для сушки сырья с различной начальной влажностью до требуемой конечной, при соответствующей производительности.

Анализ кинетических кривых (рис.2.) показал, что наилучшее перемешивание имеет место при рабочих параметрах

параметры математической модели измельчения, предложенной Александровским А.А. и Ахмадеевым Ф.Г., с учетом изменения влажности в процессе получения порошков в вибрационной вакуумной сушилке-мельнице, которые в явном виде имеют вид:

$$\ln \lambda = -0.202 + 0.049 \cdot W \quad (4)$$

$$\ln \beta = 0.0398 + 0.00024 \cdot W \quad (5)$$

По результатам расчета кинетики измельчения была построена кривая кинетики измельчения с целью сравнения ее с кинетикой

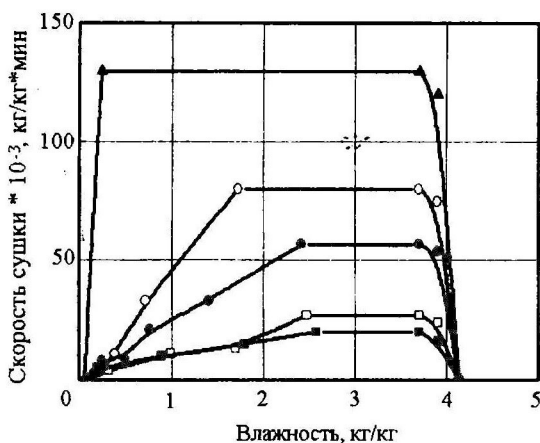
сушки в процессе получения порошков. Сравнительная оценка кинетики вибровакуумной сушки и измельчения (рис.3) позволила сделать вывод, что измельчение не является лимитирующей стадией процесса получения порошков, так как протекает значительно быстрее, и при этом обеспечивает проведение сушки исключительно в первом периоде сушки за счет обеспечения постоянно обновляемой поверхности испарения.

В четвертой главе представлено теоретическое и экспериментальной изучение процесса сушки растительного сырья, как основного процесса получения порошков.

Основной особенностью процесса сушки растительного сырья являются ограничения по температуре и высокой тепловой нагрузке, поэтому температура теплоносителя для сушки растительного сырья принимается не выше 80°C для сохранения состава и качества исходного сырья. Температура внутри вибрационной сушилки-мельницы зависит от давления внутри аппарата.

Оптимальные параметры вибрации выбираются для обеспечения интенсивного перемешивания и измельчения материала. Вибрационное перемешивание при этих параметрах должно обеспечивать максимальный теплообмен между греющей поверхностью и обрабатываемым материалом, который определяет интенсивность сушки в целом. Выбранные параметры вибрации должны быть оптимальными для процесса измельчения материала, что позволяет проводить процесс в первом интенсивном периоде сушки при постоянной температуре материала.

Учитывая многофакторность процесса получения порошков в вибрационной



- - контактная сушка при атмосферном давлении;
- - контактная сушка при пониженном давлении;
- - сушка в ВСУ без вибрации при пониженном давлении;
- - вибрационная сушка в ВСУ;
- ▲ - вибрационная сушка с одновременным измельчением в ВСУ.

Рис.4.Кривые скорости сушки картофеля в ВСУ

вакуумной сушилке-мельнице, проводились экспериментальные исследования в лабораторной вибровакуумной сушилке-мельнице по оценке степени влияния вакуума, вибрации, измельчения на кинетику сушки на примере черной смородины, репчатого лука, картофеля, свеклы, ярких представителей различных классов растительного сырья, составляющие основную и незаменимую часть рациона питания людей России.

Для сравнительной оценки результатов сушки в вибрационной вакуумной сушилке-мельнице, а также для выбора начального размера частиц проводились экспериментальные исследования контактной сушки в вакуумном и атмосферном шкафах.

Сравнение контактной сушки материалов в шкафах при атмосферном давлении и вакууме (рис.4) показывает, что снижение давления до 20 кПа увеличивает скорость сушки в 1-1.5 раза.

Вибрационное перемешивание в процессе сушки способствует интенсивному теплообмену между греющей поверхностью и загрузкой за счет перераспределения нагретых частиц в объеме загрузки, что выравнивает температуру и влажность в нем. Таким образом, в процессе вибрационной сушки (рис.4) скорость процесса возрастает в 3-3.5 раза по сравнению с контактной сушкой при атмосферном давлении.

Однако, основная интенсификация сушки растительного сырья происходит за счет применения одновременного вибрационного измельчения в процессе вакуумной сушки, что позволяет проводить процесс исключительно в первом периоде за счет постоянного увеличения поверхности удаления влаги и увеличивает скорость процесса (рис. 4) в 4-5 раз по сравнению с контактной сушкой при атмосферном давлении.

Полученные экспериментальные данные по степени влияния на процесс сушки смешения и измельчения позволили найти способ решения совместного математического описания этих процессов с достаточно высокой точностью и определить степень влияния отдельных параметров на кинетику процесса, а также оценить величину ошибки, вводимой каждым параметром в математическое описание всего сложного процесса.

Представлено математическое описание процесса вакуумной сушки с учетом особенностей теплообмена в виброкипящем слое загрузки и кинетики измельчения.

Общий тепловой поток, передаваемый через греющую поверхность и греющий воздух к нагреваемому материалу, в практических расчетах рассчитывают по формуле Ньютона:

$$Q_{\text{прих}} = \alpha_{\text{конд}} \cdot F \cdot (T_{2p} - T_{\text{м}}) + \alpha_{\text{к}} (T_{\text{ср}} - T_{\text{м}}) F_{\text{мат}} \quad (6)$$

Коэффициент теплообмена между греющей поверхностью и высушиваемым материалом, который будет меняться в течение процесса сушки, находят по формуле:

$$\alpha_{\text{конд}} = \sqrt{\lambda_3 \rho_3 c_3} / \sqrt{\pi \tau_k}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град} \quad (7)$$

С изменением влажности и дисперсного состава материала изменяются и теплофизические характеристики. Коэффициенты теплопроводности, теплоемкости и плотность загрузки находятся с учетом этих изменений и изменения соотношения "мельющие тела : материал" за счет уменьшения в процессе сушки последнего.

Доля периода контакта загрузки с греющей поверхностью τ_k находится с учетом взаимодействия загрузки с корпусом аппарата при изменении влажности и объема загрузки, на основании результатов, полученных в главе 2.

Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности загрузки можно определить по формулам

$$\lambda_3 = \lambda_2 \left[1 + \frac{(1 - \varepsilon) \left(1 - \lambda_u / \lambda_c \right)}{\lambda_2 / \lambda_u + 0,28 \varepsilon^{0,63} \left(\lambda_u / \lambda_2 \right)^{0,18}} \right] \quad (8)$$

$$a_3 = \lambda_3 [c_u \rho_u (1 - \varepsilon) + c_p \rho_p \varepsilon]^{-1} \quad (9)$$

Согласно теории подобия порозность загрузки можно представить в виде следующего критериального уравнения:

$$\varepsilon = 0,287 \left(\frac{\rho_c d_3^2 \omega^*}{\mu_c} \right)^{-0,0016} \left(\frac{A_k}{d_3} \right)^{0,092} \left(\frac{A_k \omega^2}{g} \right)^{0,144} \left(\frac{m}{R_k^3 \rho_M} \right)^{0,176} \left(\frac{r_u}{R_k} \right)^{0,22} \quad (10)$$

$$\omega^* = \exp \left[3,29 \left(\ln \frac{A_k \omega^2}{g} \right)^{0,25} \right] \quad (11)$$

Коэффициент конвективного теплообмена можно определить по формуле А.В. Нестеренко:

$$Nu = 0,51 Re^{0,61} Pr^{0,33} Gu^{0,175} \quad (12)$$

Площадь поверхности материала определяется из выражения

$$F_{mat} = \frac{6(1 - \varepsilon)}{S_{y\partial}} \quad (13)$$

Тепло, подводимое к высушиваемому материалу, расходуется на испарение влаги, поскольку материал предварительно прогревается в зоне загрузки. Тогда уравнение теплового баланса запишется в следующем виде:

$$Q_{nрих} = -r \frac{du}{dt} \quad (14)$$

где r - удельная теплота парообразования, Дж / кг и определяется уравнением вида:

$$r = r_0 + (c_n - c_{ж}) (T_m - 273) \quad (15)$$

Сушка при постоянном отсосе испарившейся влаги протекает при непрерывной циркуляции сушильного агента через материал, температура в камере от входа к выходу теплоносителя понижается. В аппарате происходит удаление свободной влаги, движение которой внутри материала осуществляется под действием градиентов давления, влажности и температуры.

При нахождении всех частиц в одинаковых условиях и идеальном перемешивании компонентов пара уравнение материального баланса по паровому компоненту парогазовой смеси, находящейся над поверхностью влажного материала, можно записать в виде

$$m_c \frac{du}{d\tau} - Q_n \rho_n = V \frac{d\rho_n}{dL} \quad (16)$$

В последнем уравнении первый член левой части выражает приток парового компонента в парогазовую смесь за счет его испарения с поверхности влажного материала; второй член – отвод парового компонента из аппарата в вакуумную линию; правая часть – изменение парциальной плотности парового компонента в парогазовой смеси, содержащейся в аппарате.

Обычно при сушке понижением давления сушильная камера подключается к вакуумному насосу через конденсатор, который работает как своеобразный насос по пару. Очевидно, что в этом случае объемная производительность системы удаления пара будет складываться из объемных производительностей вакуумного насоса и конденсатора

$$Q_n = Q_v + Q_k \quad (17)$$

Объемные производительности конденсатора и вакуумного насоса определяются соответственно из выражений:

$$Q_k = \frac{S_k k \Delta t_k}{r \rho_{cm}} \quad (18)$$

$$Q_v = \frac{V}{\tau_0} \cdot \ln \frac{P_{осм}}{P_{атм}} \quad (19)$$

Плотность парогазовой смеси можно связать с давлением через уравнение Менделеева-Клапейрона

$$\rho_i = \frac{P_i \mu_i}{RT_{cm}} \quad (20)$$

Продифференцировав выражение (20) получим

$$\rho_i = \mu_i \frac{T_{cm} dp_i - P_i dT_{cm}}{RT_{cm}^2} \quad (21)$$

Подставив выражения (20), (21) в уравнения (16), после некоторых преобразований получим дифференциальные уравнения изменения давлений по i -му компоненту над материалами:

$$\frac{dp_i}{d\tau} = \frac{F_{ам} RT_{cm}}{V_{св} \mu_i} j_{i,нов} - P_i \left(\frac{Q_{сн}}{V_{св}} - \frac{1}{T_{cm}} \frac{dT_{cm}}{d\tau} \right) \quad (22)$$

Полное давление среды определяем по закону Дальтона суммой парциальных давлений водяного пара p_n и сухого воздуха p_z , Па:

$$P_{cp} = p_n + p_z \quad (23)$$

В первом периоде сушки, при проведении процесса сушки с постоянным давлением в системе, температура материала постоянна и определяется из приближенного решения уравнения Антуана:

$$T_m = \frac{B}{A - \ln P_{cp}} \quad (24)$$

При прохождении среды вдоль высушиваемого материала теплоноситель охлаждается. При прохождении газообразного теплоносителя над высушиваемым материалом, вследствие теплообмена, среда охлаждается.

Так как поток полностью заполняет пространство сушильной камеры, а загрузка интенсивно циркулирует, то можно считать, что теплоноситель одновременно обтекает все отдельные частицы загрузки материала. Рассматривая, одномерную задачу обтекания материала и пренебрегая молекулярной теплопроводностью теплоносителя, соотношение для определения изменения температуры агента сушки при его прохождении вдоль высушиваемого материала находят по формуле

$$\frac{dT_{cp}}{d\tau} = \frac{\alpha_k (T_{cp} - T_m) F_{mat}}{c_{\mu cp} \rho_{cp} V_{cv}} - \omega_L \frac{\partial T_{cp}}{\partial L} \quad (25)$$

Расчет уравнения (25) проводится при следующих краевых условиях начальные условия:

$$T_{mat}(0; x) = T_{m,0} \quad (26)$$

$$T(0; L) = T_0 \quad (27)$$

граничные условия:

$$\alpha_k (T_{cp} - T_m) = -\lambda \left. \frac{\partial T_{mat}}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (28)$$

$$T(\tau; L) = T_0 + dT(\partial\tau) \quad (29)$$

Таким образом, решая совместно уравнения теплового и материального баланса можно определить изменение влажности продукта по времени в процессе сушки с учетом характера взаимодействия загрузки с корпусом во время вибрационного воздействия, изменения объема и дисперсного состава материала в процессе сушки. Поэтому, в данном математическом описании процесса учитываются параметры, характеризующие перемешивание и измельчение материала.

Предложенное математическое описание процесса получения порошков адекватно описывает эксперимент. При этом, среднестатистическая ошибка не превышает 10%.

В пятой главе представлена инженерная методика расчета вибрационной вакуумной сушилки-мельницы. По заданной производительности по порошку рассчитывается производительность исходного материала, объем аппарата, габаритные размеры, оптимальные параметры вибрации, конструкционные элементы вибромашины, мощность электродвигателя. Представлена блок-схема технологического расчета вибрационной вакуумной сушилки мельницы. Приведены примеры расчета вибрационной вакуумной сушилки-мельницы по заданной производительности по порошку 30кг/час, 6 кг/час, 0.05 кг/час. Разработана модернизированная технологическая схема непрерывного получения пищевых порошков из растительного сырья

Условные обозначения: Π_1 - параметрический критерий; A – коэффициент Антуана для воды; A_k - амплитуда колебаний, м; B – коэффициент Антуана для воды; c_3 - удельная теплоемкость материала, Дж/кг·град; D – внутренний диаметр корпуса смесителя, м; d_3 - эквивалентный диаметр частиц материала и мелющих тел, м; d_{cp} - средний диаметр частиц, м; F –площадь теплообмена, m^2 ; Fg – критерий Фруда; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; M - молекулярный вес воды,

кг/моль; m_c - масса сухого материала, кг; m - масса загрузки, кг; N - скорость сушки, кг.вл./кг.с.·мин; P_{II} - давление в вакуум - системе, кПа; $q_{исп}$ - интенсивность испарения жидкости, кг²/с; $Q_{прих}$ - количество тепла, передаваемого от стенки корпуса к материалу, Дж; Q_n - производительность насоса, кг/м³; Q_k - производительность конденсатора, кг/м³; r_c - расстояние от точки регистрации локальной порозности до условного центра вращения загрузки, м; R_k - радиус цилиндрической части корпуса вибросмесителя, м; R - универсальная газовая постоянная, Дж/кг·К; r - удельная теплота парообразования, Дж / кг; T_M - температура материала, °С; T_p - температура греющей поверхности, °С; u - влагосодержание материала, кг вл./кг.с.; W - влажность, кг.вл./кг.с.в.; α - коэффициент теплоотдачи, Вт / м²град; ε - порозность; ρ_m - насыпная плотность загрузки, кг/м³; β, λ - параметры модели измельчения; ρ_c, μ_c - плотность и коэффициент динамической вязкости среды в которой происходит процесс, кг/м³, Па·с; λ_3 - коэффициент теплопроводности загрузки, Вт/м·град; ρ - плотность пара, кг/м³; ρ_3 - плотность загрузки, кг/м³; ρ_M - плотность материала, кг/м³; τ - время, с; ω^* - скорость движения частиц материала; ω - угловая скорость вращения вала вибратора, 1/с.

Индексы: нач, кон - соответствует начальному и конечному значению времени сушки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан способ получения порошков из растительного сырья совмещением процессов сушки, смешения и измельчения в аппарате непрерывного действия, позволяющий проводить весь процесс сушки исключительно в первом наиболее интенсивном периоде. Способ реализован в вибрационной сушилке-мельнице непрерывного действия, на которую получено положительное решение по патенту на изобретение.

2. На основании теоретического анализа взаимодействия загрузки и корпуса аппарата выявлены параметры вибрации ($A_k, \omega, k_{зав}$), обеспечивающие максимальную скорость смешения, которая определяет интенсивность теплообмена между греющей поверхностью и высушиваемым материалом. Экспериментально получены интервалы оптимальных параметров в виде критериев: параметрического

$$P_1 = \frac{A_k}{D} = (5 \div 7) \cdot 10^{-3} \text{ и Фруда } Fr = \frac{A_k \omega^2}{g} = 8 \div 11, \text{ обеспечивающих максимальную интенсивность теплообмена.}$$

3. Экспериментально оценена степень влияния на сушку термолabileльных продуктов: давления, вибрационного воздействия и сопутствующего измельчения.

4. Теоретические и экспериментальные исследования кинетики измельчения позволили установить:

а) оптимальные параметры вибрации соответствуют параметрам, обеспечивающим максимальную скорость вибрационного смещения;

б) выбрана математическая модель, адекватно описывающая кинетику измельчения растительного сырья;

в) экспериментально установлена зависимость параметров модели от влажности, изменяющейся в процессе сушки и сопутствующего измельчения;

г) процесс измельчения не является лимитирующей стадией процесса получения порошков, а обеспечивает первый период сушки до полного удаления влаги.

5. Разработано математическое описание процесса вакуумной сушки с учетом особенностей теплообмена и измельчения при вибрационном воздействии. Проверена адекватность данного математического описания процесса получения порошков экспериментальным данным. Получена удовлетворительная сходимость расчетных и экспериментальных значений времени сушки. Среднестатистическая ошибка не превышает 10%.

6. Разработана инженерная методика расчета вибрационной сушилки-мельницы непрерывного действия, представлена блок-схема и примеры расчета. На порошки из растительного сырья разработаны технические условия ТУ 9164-001-2069635-93 "Порошки пищевые растительного происхождения", получен гигиенический сертификат № 478358 от лаборатории на основании протокола анализа качества порошков в лаборатории СЭС. С использованием методики расчета разработана техническая документация на вибрационную сушилку-мельницу объемом 200 л., на основании которой изготовлен промышленный образец, работающий на предприятии ОАО «Таткрахмалпатока».

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях

1. Тухбиева, Э.Х. Технология пищевых порошков из отходов ликеро-водочного производства./ Э.Х.Тухбиева, Н.З.Дубкова, З.К.Галиакберов, В.Ф. Шарафутдинов, А.Н.Николаев // Известия вузов. Пищевая технология. Краснодар, 2010.- № 2-3.- С.57-59.

2. Дубкова, Н.З. Технология получения порошка из ягод черники/ Н.З.Дубкова, Э.Х.Тухбиева //Техника и технология пищевых производств. Кемерово, 2010-№2.- С.65-69.

3. Дубкова, Н.З. Непрерывная технология производства пищевых порошков из растительного сырья/ Н.З.Дубкова, Э.Х. Тухбиева // Известия вузов. Пищевая технология. Краснодар, 2010.- № 4.- С.47-50.

Патент

4. Заявка на патент «Вибрационная шаровая мельница» №2009140558/21(057656) 02.11.2009 (Положительное решение).

Публикации в журналах и сборниках трудов конференций

5. Тухбиева, Э.Х. Непрерывная вибрационная сушилка-мельница./ Э.Х.Тухбиева, Н.З.Дубкова. // Материалы IV международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых : «Научный потенциал студенчества в XXI веке», Ставрополь, 2010.- С.505-508.

6. Тухбиева, Э.Х. Непрерывная технология производства пищевых порошков из растительного сырья./ Э.Х. Тухбиева, Н.З.Дубкова, З.К.Галиакберов, А.Н. Николаев // Материалы II международной научно-технической конференции: «Новое в технике и технологии пищевых производств», Воронеж, 2010.- С.418-419.

7. Тухбиева, Э.Х. Получение пищевого порошка из свежемороженой черники в вибро-вакуумной сушилке мельтцы / Э.Х. Тухбиева., Н.З.Дубкова, З.К.Галиакберов, А.Н. Николаев. // Материалы II международной научно-технической конференции: «Новое в технике и технологии пищевых производств», Воронеж, 2010.- С.420.

8. Тухбиева, Э.Х. Условие отрыва слоя жидкости от вибрирующей поверхности/ Э.Х.Тухбиева, Н.З.Дубкова, З.К.Галиакберов, А.Н. Николаев // Материалы XXIII- Международной научной конференции: «Математические методы в технике и технологиях- ММТТ-23», Саратов, 2010., т.8.- С.164-165.

9. Тухбиева, Э.Х. Движение массива шариков в вибрационном аппарате с круговой траекторией колебаний корпуса./ Э.Х.Тухбиева, Н.З.Дубкова, З.К.Галиакберов, А.Н. Николаев // Материалы XXIII- Международной научной конференции: «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-23», Саратов, 2010. т.3.-С.108-111.

10.Тухбиева, Э.Х. Кинетика измельчения в вибрационной сушилке-мельнице при производстве порошков из растительного сырья./ Э.Х.Тухбиева, Н.З.Дубкова, З.К.Галиакберов, А.Н.Николаев // Материалы 3-й Всероссийской научно-практической конференции: «Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности», Бийск, 2010.- С.361-363.

11.Тухбиева, Э.Х. Технология пищевых порошков из отходов ликероводочного производства./ Э.Х.Тухбиева, Н.З.Дубкова, З.К.Галиакберов, А.Н.Николаев // Материалы 3-й Всероссийской научно-практической конференции: «Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности», Бийск, 2010.- С.323-325.

12.Тухбиева, Э.Х. Непрерывная технология производства пищевых порошков из растительного сырья/ Э.Х.Тухбиева, Н.З.Дубкова, З.К.Галиакберов, А.Н.Николаев // Материалы V научно-практической конференции молодых ученых. Магнитогорск, 2010.- С.209-211.

13.Дубкова, Н.З.Производство пищевых порошков из растительного сырья/ Н.З.Дубкова, Э.Х.Тухбиева, А.Н.Николаев // Материалы Международного научно-технического семинара: «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов», Воронеж, 2010.- С.194-199.

14.Дубкова, Н.З. Исследование непрерывного процесса получения порошков из растительного сырья/ Н.З.Дубкова, Э.Х.Тухбиева; Казанск.госуд.технол.унив.- Казань, 2010.-21с.- Деп. в ВИНТИ 11.05.10, № 266-В-2010.

15.Дубкова, Н.З. Движение массива шариков в вибрационном аппарате с круговой траекторией колебаний корпуса/ Н.З. Дубкова, Э.Х.Тухбиева; Казанск.госуд.технол.унив.- Казань,2010.-17с.-Деп. в ВИНТИ 11.05.10, № 267-В-2010.

16.Тухбиева, Э.Х. Исследование перемешивающей способности непрерывной вибрационной сушилки-мельницы/ Э.Х.Тухбиева, Н.З.Дубкова, З.К.Галиакберов, А.Н.Николаев //Материалы III научно-практической конференции с международным участием: «Современное состояние и перспективы развития пищевой промышленности и общественного питания», Челябинск, 2010. - С.196-199.

17.Тухбиева, Э.Х. Непрерывная вибрационная сушилка-мельница для производства пищевых порошков/ Э.Х.Тухбиева, Н.З.Дубкова, З.К.Галиакберов, Николаев А.Н. // Материалы III научно-практической конференции с международным участием: «Современное состояние и перспективы развития пищевой промышленности и общественного питания», Челябинск, 2010. - С.199-202.

Соискатель



Э.Х. Зарипова

Заказ 29.

Тираж 100 экз.

Офсетная лаборатория

ГОУ ВПО «Казанского государственного технологического университета»

420015, Казань, К.Маркса, 68.

